

## Experimental Computational Simulation of a Galaxy Cluster

### Experimento Computacional de uma Simulação de um Aglomerado de Galáxias

Article Info:

Article history: Received 2023-05-12 / Accepted 2023-05-15 / Available online 2023-09-08

doi: 10.18540/jcecv19iss7pp16537-01e



**Cláudio Soriano de Souza Brandão**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1337-0153>

Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil

E-mail: [cssbrandao@uesc.br](mailto:cssbrandao@uesc.br)

**Jorge Henrique de Oliveira Sales**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1992-3748>

Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil

E-mail: [jhosales@uesc.br](mailto:jhosales@uesc.br)

#### Abstract

Galaxy clusters are large structures composed of galaxies, intra-cluster gas, and dark matter. The kinematics of their constituent galaxies are still studied observationally, although computational experiments serve as true simulation laboratories, reproducing observational aspects in these systems. In fact, while astrophysicists observe two-dimensional projections of three-dimensional objects in the sky with telescopes, computer models simulate three-dimensional systems, using the laws of physics in an attempt to recover observational aspects. In light of the above, this work focuses on the computational simulation of a galaxy cluster, examining its dynamic stability, the physical aspects of its galaxies, and the observational counterpart of its member galaxies.

**Keywords:** gravitation, n-body, Gadget-2.

#### Resumo

Os aglomerados de galáxias são grandes estruturas composta por galáxias, gás intra-aglomerado e matéria escura. A cinemática de suas galáxias constituintes ainda é estudada observacionalmente, embora experimentos computacionais constituam em verdadeiros laboratórios de simulação, reproduzindo os aspectos observacionais nestes sistemas. De fato, enquanto os astrofísicos observam projeções bidimensionais de objetos tridimensionais no céu com os telescópios, no computador são modelados sistemas tridimensionais, usando as leis da física na tentativa de se recuperar os aspectos observacionais. Diante do exposto, estudamos neste trabalho a simulação computacional de um aglomerado de galáxias, verificando sua estabilidade dinâmica, os aspectos físicos de suas galáxias e a contrapartida observacional de suas galáxias membros.

**Palavras-chave:** gravitação, n-corpos, Gadget-2.

#### 1. Introdução

No paradigma do cenário hierárquico de estruturas, sabe-se que as estruturas menores se formaram após o Big-Bang, coalesceram e deram origem às primeiras estrelas, as quais se agruparam e originaram as galáxias, as quais, por sua vez, agruparam-se em aglomerados e assim em diante. Assim como no caso das galáxias, os aglomerados possuem matéria escura e matéria bariônica. A matéria bariônica é composta por bárions, sendo detectável por radiação eletromagnética, enquanto a detecção da matéria escura é feita de modo indireto, através do estudo da cinemática e da dinâmica de galáxias e aglomerados, uma vez que a matéria escura interage

apenas gravitacionalmente, conforme discutido por Longair (2008). Neste caso, a matéria escura engloba todo o sistema, atraindo gravitacionalmente as galáxias membros. Esta subestrutura é denominada de halo. Os tamanhos dos halos variam de um aglomerado a outro. A matéria escura contribui com 80% da massa total do sistema. Cerca de 20% da matéria bariônica são constituídos por 15% de um gás muito quente e rarefeito de elétrons relativísticos, e 5% na forma de galáxias. Admite-se que o gás está em equilíbrio hidrostático no halo. As galáxias que compõem o aglomerado possuem diversas morfologias, predominantemente galáxias elípticas e espirais (Kravtsov e Borgani, 2012).

Um método eficiente de estudar aglomerados é o de simular os respectivos modelos em computadores de alto desempenho para identificar os diversos estágios evolutivos destes objetos, comparando os resultados com suas contrapartidas observacionais. Para isto, leva-se principalmente em consideração as forças gravitacionais exercidas mutuamente entre eles em cenário simplificado usando apenas matéria escura e bariônica, posto que, em grandes escalas a força gravitacional do halo supera as demais. De fato, as simulações numéricas de *N*-Corpos constituem-se em verdadeiros laboratórios astrofísicos para entender como eles evoluem, pelo menos na sua contrapartida gravitacional. Este estudo objetiva simular um aglomerado com riqueza de 20 galáxias, em equilíbrio virial, fazendo-o evoluir no tempo e verificar os seguintes aspectos: violação da conservação da energia total do sistema em simulação, os encontros próximos e a detecção dos efeitos de maré decorrentes da ação do halo sobre as galáxias membros (Brandão, 2006).

Uma simulação de *N*-Corpos usa o conceito de que a distribuição de matéria é representada por *N* partículas. Existem diversos métodos, mas o usado neste trabalho é o de partícula-partícula. Neste caso, uma partícula representa uma porção da matéria total e a soma das massas das *N* partículas corresponde à da massa total do sistema. As partículas devem ser distribuídas através de um modelo matemático que representa acuradamente o objeto estudado ou a sua categoria. Por exemplo, se se simula um disco de uma galáxia espiral, a forma geométrica e a distribuição de densidades deve ser a mais acurada possível. Deste modo, há de se frisar que quanto mais partículas são usadas para representar o modelo, maior será a sua resolução, isto é, a capacidade de representar as condições físicas e os efeitos físicos em questão. Para os cálculos das forças gravitacionais e de demais efeitos físicos são usados diversos programas de computador (códigos de *N*-Corpos). Neste trabalho, usa-se o Código Gadget-2 (Springel, 2005), para simular as forças gravitacionais entre partículas de matéria escura de um halo de um pequeno aglomerado e matéria bariônica hospedada em galáxias-membros do grupo. Tal escolha se deve ao fato de que o Gadget-2 é muito eficiente, posto que pode paralelizar tarefas computacionais, dividindo o esforço computacional e usa diversas técnicas de simulação, como a da partícula-malha, malha-malha, dentre elas as usada nesta pesquisa (Springel, 2005) para uma descrição completa do Código.

A suposição é a da existência de um aglomerado composto principalmente por matéria escura, cujas galáxias-membros estão orbitando hospedadas no halo do aglomerado. Embora Brandão (2006) encontre um problema de violação na conservação da energia total simulada, que a princípio não deveria acontecer, a hipótese mais provável é a de que o modelo não leva em conta efeitos de dissipação da energia total devido a efeitos de espalhamento entre as partículas. A sugestão é a de uma possível escolha equivocada do parâmetro de amolecimento, responsável para impedir que as partículas sejam submetidas a efeitos de espalhamento gravitacional, ou seja, que a força gravitacional entre duas partículas muito próximas atinja valores numéricos muito elevados, forçando o Sistema a se comportar colisionalmente. É possível demonstrar que é um objeto composto por muitas partículas interagindo gravitacionalmente o potencial gravitacional coletivo domine sobre o potencial gravitacional individual, conforme discutido por Binney e Tremaine, (2008).

Além desta questão, a análise realizada por Brandão (2006) precisa ser revista, pelo menos para o modelo que viola a Lei de Conservação da Energia Total. Questiona-se neste trabalho se uma simulação de um halo por bilhões de anos pode estabilizar o problema da conservação da energia gravitacional total e se é possível recuperar alguns aspectos obtidos por meio de observações feitas seja em telescópios ou radio-telescópios.

## 2. Metodologia

### 2.1 Passos para a Realização de uma Simulação.

Os passos para a realização da uma simulação foram:

1. Condições Iniciais: Atribuição de posições, velocidades e rótulos de identificação das partículas do modelo a ser simulado num arquivo de condições iniciais. Este passo segue um modelo prescrito pela física que procura explicar as características observadas em telescópios dos objetos reais.
2. Estudo do Código: Realização do download do Código e instalação.
3. Realização das simulações e obtenção de resultados.
4. Análise crítica dos resultados.

### 2.2 Condições Iniciais

Neste cenário simplificado, o halo de matéria escura do aglomerado segue o Perfil Radial de Densidades de Hernquist (1990):

$$\rho(r) = \frac{M a}{2\pi r} \frac{1}{(r+a)^3} \quad (1)$$

Nesta Equação,  $M$  é a massa total do halo,  $r$  é a distância de uma dada partícula ao centro da esfera e  $a$  é a escala característica da esfera. Ao invés da técnica usada por Brandão (2006), substitui-se aqui o halo, antes representado por uma prescrição analítica, por um sistema de partículas em Equilíbrio Virial. A massa total do Halo é  $2 \times 10^{13} M_{\odot}$  e  $a = 300$  kpc.

Todas as galáxias membros do halo foram modeladas segundo o modelo MRAND descrito por Brandão (2006). Neste trabalho, todas as galáxias são representadas pelo perfil de densidades de King e no tempo  $t = 0$  (Binney, 1998), a riqueza do aglomerado é de 20, cujas massas foram atribuídas seguindo a Função de Schechter (1976). Os procedimentos para a construção das condições iniciais seguem a prescrição do modelo MRAND proposto por Brandão (2006).

**2.3.** Este trabalho difere da Dissertação de Mestrado de Brandão porque as condições iniciais são modeladas seguindo um modelo representado por partículas, enquanto no trabalho de Brandão (2006), usa-se um potencial gravitacional analítico para representar os efeitos gravitacionais do halo de matéria escura do Halo do Aglomerado. Além disto, comparando com o trabalho de Brandão (2006), usa-se aqui uma versão mais acurada do Código Gadget (Springel, 2005), o Gadget-2, que calcula as forças gravitacionais mútuas entre as partículas constituintes com mais acurácia.

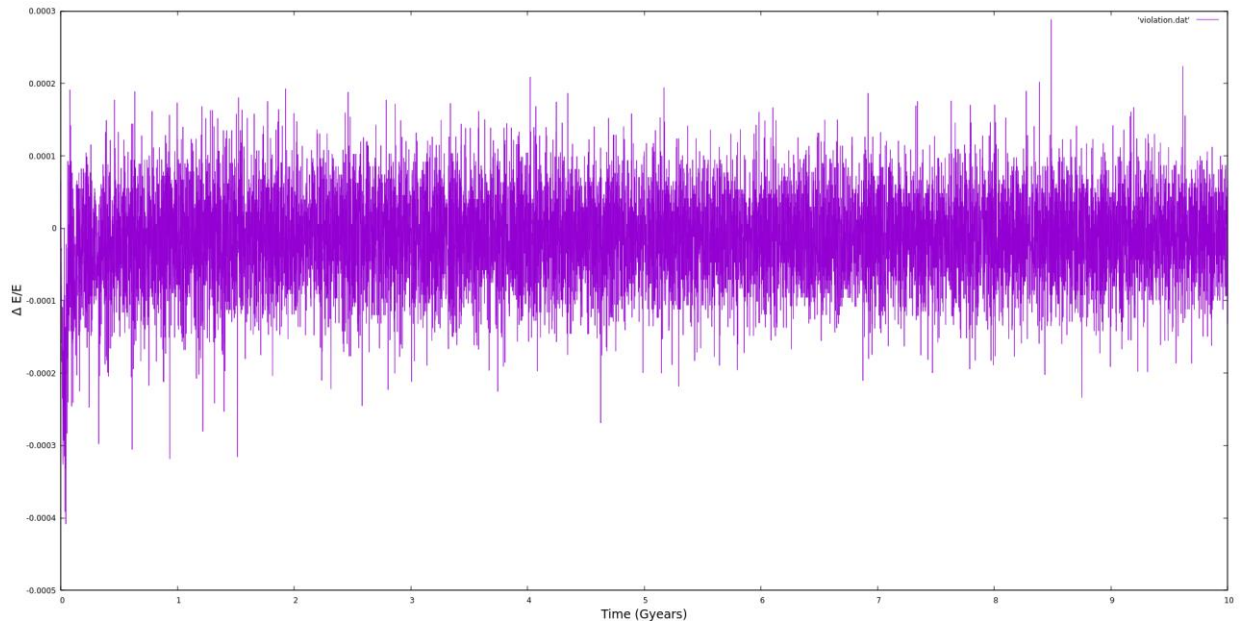
**2.4** Como programa de análise e visualização de dados, adotam-se aqui scripts em linguagem Python, usando o programa yt, conforme Turk *et al.*, (2011). Os scripts exibem e reproduzem os principais observáveis cujas contrapartidas físicas e observacionais são usadas em Astrofísica. Neste experimento, é usado o Linux Fedora 36 LXQT e o seguinte setup de hardware: processador core i7, 8GB de memória RAM, com aceleração de vídeo por uma placa NVIDIA GEFORCE GTX 1050 com 4GB de memória.

## 3. Resultados

### 3.1 Violação da Conservação da Energia Total

A Figura 1 exhibe a violação da conservação da energia total em relação ao passo temporal anterior  $\frac{\Delta E}{E_n}$ , onde  $E_n \equiv E(t)$  é a energia total em função do tempo e o subscrito  $n$  denota o passo temporal correspondente ao tempo e  $\Delta E \equiv E(t + 1) - E(t)$  durante 10 bilhões de anos de simulação.

O código computa a energia cinética e a energia potencial totais do sistema de  $N$  partículas e escrevemos um algoritmo em FORTRAN para calcular a violação da conservação da energia total.



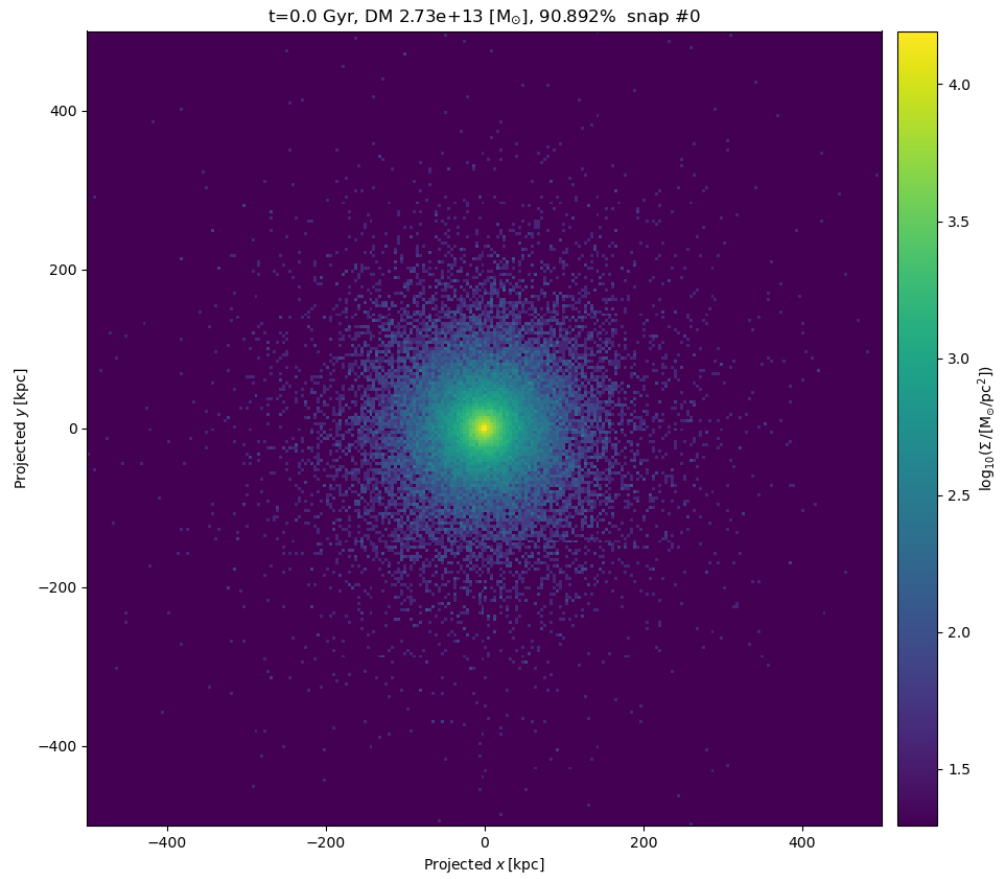
**Figura 1 -Evolução temporal da violação da energia total.  
Fonte: Autores.**

A violação da conservação da energia é muito pequena devido à escolha adequada do parâmetro de amolecimento  $\epsilon = 0.1$ , em comparação com os resultados obtidos por Brandão (2006). Esta escolha é realizada com base no número de partículas do modelo. Brandão (2006) usa o parâmetro de amolecimento  $\epsilon = 0.004$ , forçando o código a computar efeitos de espalhamento. Isto sugere que é possível simular um aglomerado em cenário simplificado (sem a presença do gás) com êxito.

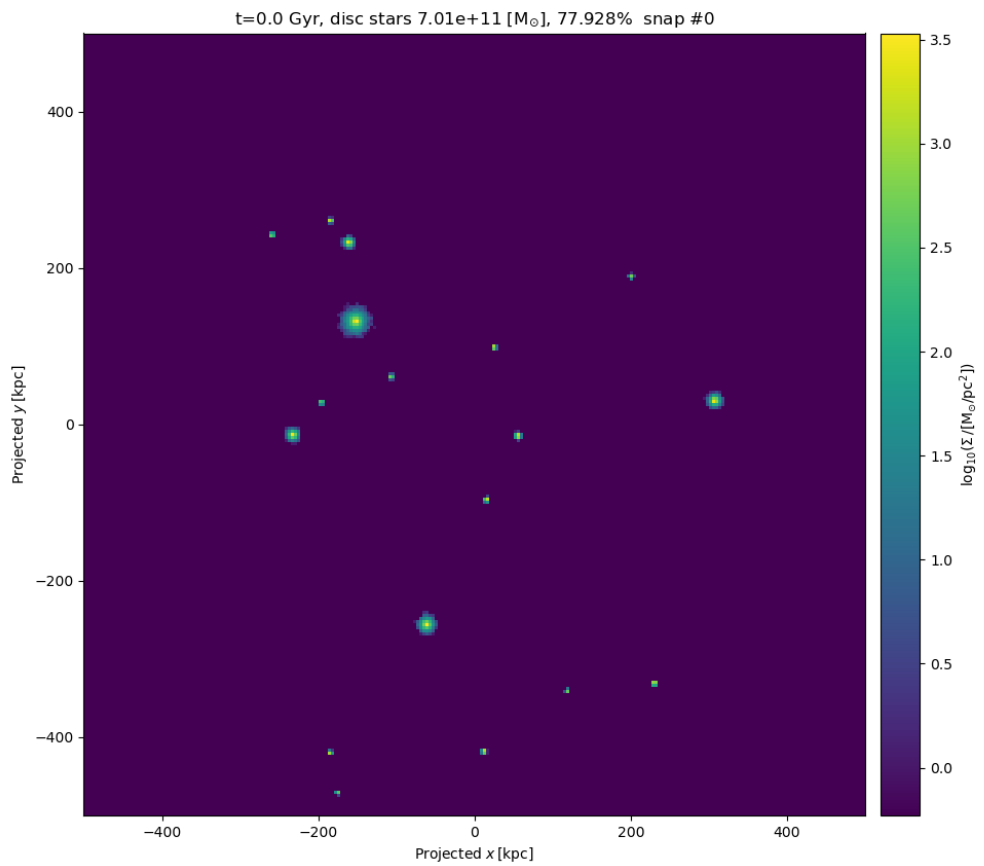
### 3.2 Aspectos Observacionais

Na Figura 2 pode-se observar as posições projetadas das partículas do halo de matéria escura em função do logaritmo decimal da densidade projetada  $\Sigma \left( \frac{M_{\odot}}{pc^2} \right)$ ,  $\log \Sigma \left( \frac{M_{\odot}}{pc^2} \right)$ , onde  $M_{\odot}$  é dado em massas solares e  $pc^2$  é a medida de área, devido a efeitos de projeção. A concentração de matéria no centro da imagem indica justamente que a modelagem do esferoide está em acordo com o que se espera para uma esfera de Hernquist. Conforme já mencionado, o objetivo deste trabalho é o de verificar como usar o código Gadget-2 e visualizar alguns dados observáveis dos resultados obtidos de um aglomerado simulado. Não se objetiva neste trabalho abordar o estudo da dinâmica de tais esferoides, porém recuperar a contrapartida observável das galáxias.

As posições iniciais das galáxias membros são projetadas no plano-xy conforme verifica-se na Figura 3. Exibe-se nesta Figura a distribuição da matéria em esferoides, salientando que os demais componentes do aglomerado se encontram próximos do raio virial.



**Figura 2 - Snapshot inicial das partículas do Halo de matéria escura do halo.**  
**Fonte: Autores.**

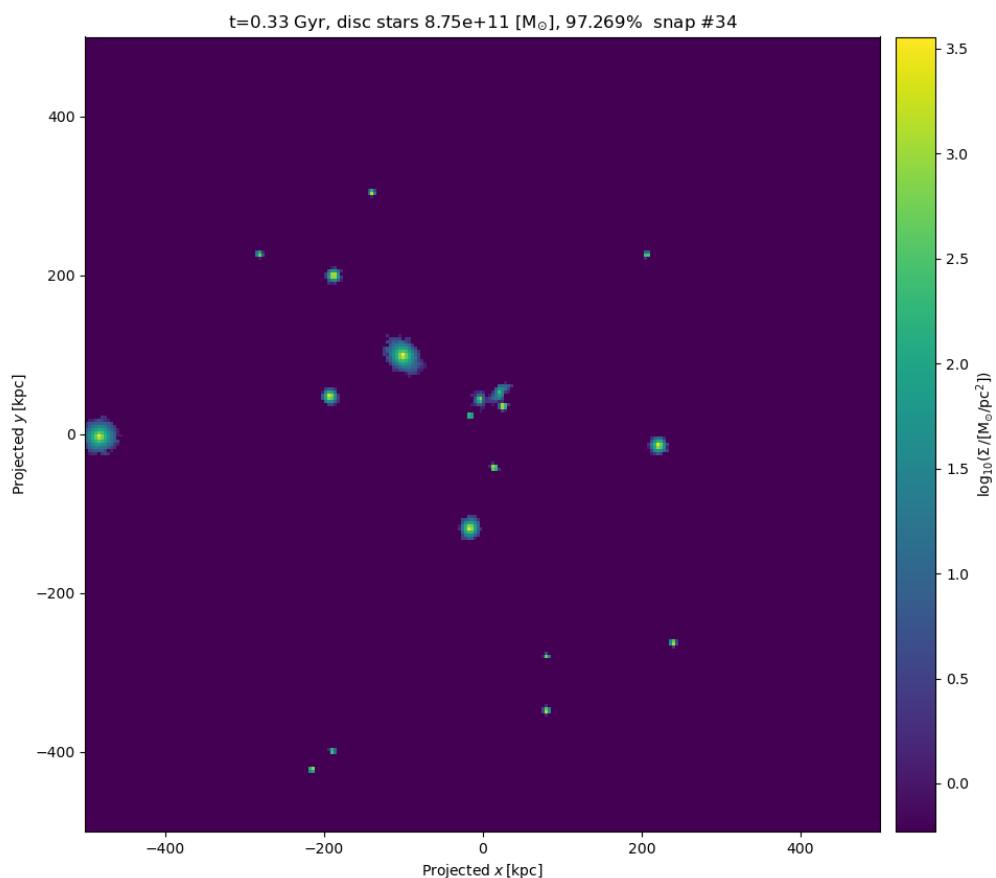


**Figura 3 - Visualização das Galáxias membros do halo no instante inicial.**

**Fonte: Autores.**

Na Figura 3, pode-se visualizar as galáxias membros do aglomerado no instante inicial com  $t = 1$  Gano. Neste caso, consideramos o sistema em equilíbrio dinâmico, com o halo virializado. À medida que o tempo passa, as galáxias se aproximam do centro, conforme exibimos na Figura 4. As órbitas são predominantemente radiais. A evolução do sistema ocorre no sentido de aproximação dos objetos para o centróide do aglomerado, favorecendo o surgimento de encontros próximos e colisões entre as galáxias.

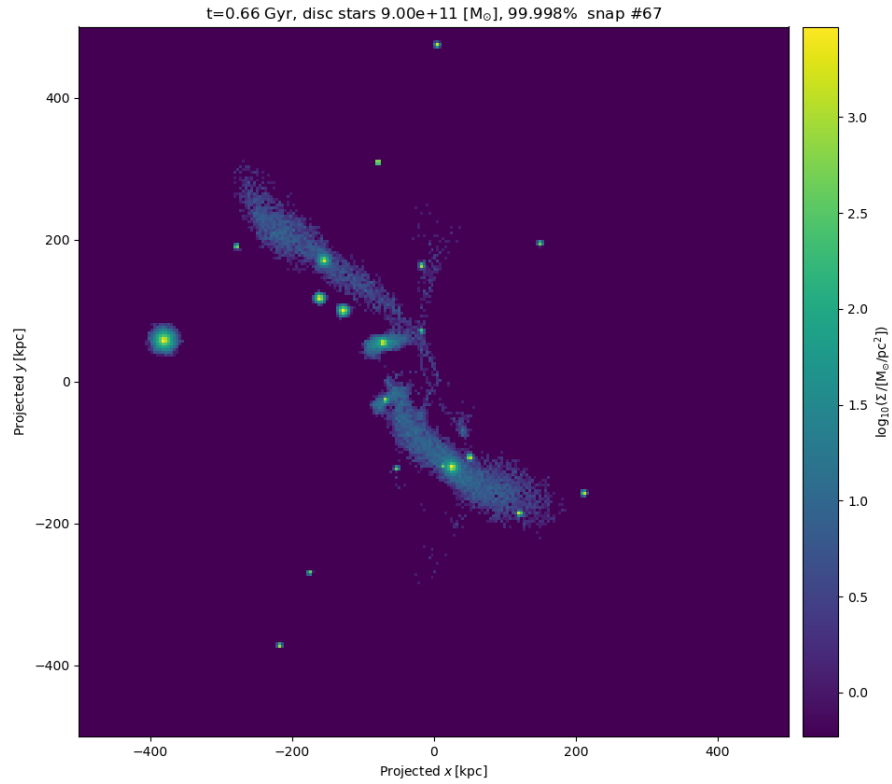
Na Figura 4, observa-se que algumas galáxias se encontram mais próximas umas das outras e no centro da distribuição de matéria. No canto esquerdo da imagem observa-se a aproximação de uma galáxia mais distante, devido à força de gravitação do halo. A morfologia das galáxias centrais se altera um pouco mais, nas galáxias do centro, devido à perda de matéria para o meio intra-aglomerado. Espera-se que num tempo mais avançado de simulação a matéria se concentre no centro do halo, pois é neste local onde a maior parte da matéria total do sistema é distribuída.



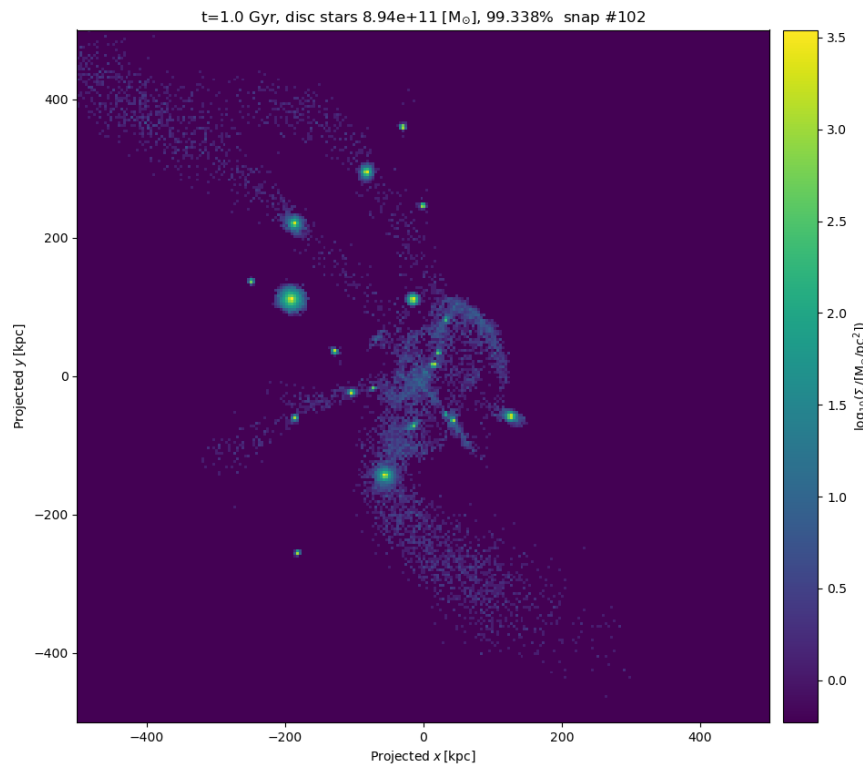
**Figura 4 – Snapshot para o tempo  $t = 0.33$  Gano.**

**Fonte: Autores.**

Percebe-se que as partículas que representam a matéria bariônica se espalham para o meio intra-aglomerado (Figuras 5 e 6). Também deve-se salientar que os efeitos de maré do halo contribuem para o fenômeno de “*tidal stripping*”, arrancando a matéria visível das galáxias na forma de gás e estrelas de suas galáxias originais e ejetando-as para o meio intra-aglomerado. Mesmo assim, percebe-se claramente que o potencial gravitacional coletivo da matéria predomina sobre os individuais, mantendo na média as galáxias coesas, apesar do “*tidal stripping*” ter ocorrido com alguns objetos.

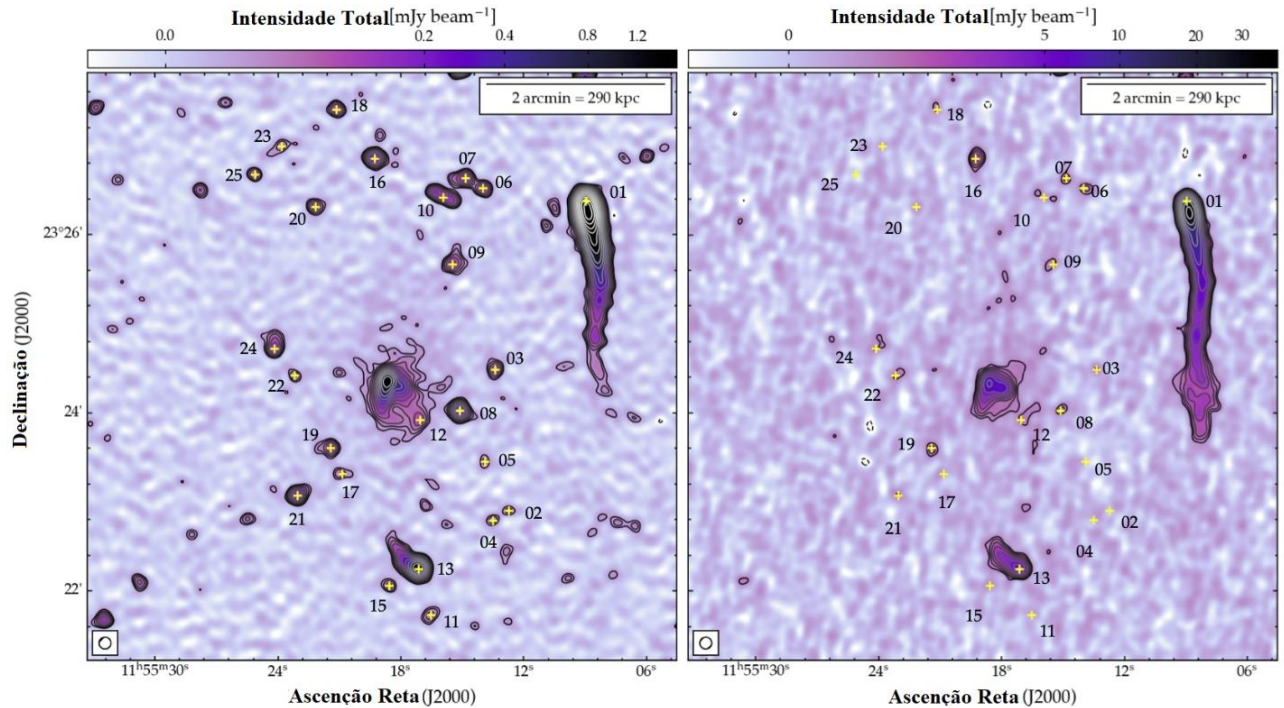


**Figura 5 – Snapshot para o tempo  $t = 0.66$  Gano.**  
**Fonte: Autores.**



**Figura 6 – Snapshot para o tempo  $t = 1.00$  Gano.**  
**Fonte: Autores.**

A Figura 7 exibe um típico Aglomerado, no caso o Abell 1413, conforme estudado por Riseley *et al.* (2023). A imagens foram obtidas por radiotelescópios. Nota-se uma semelhança com a Evolução do Sistema Simulado. Percebe-se a existência de matéria densa no centro do sistema, cuja origem ainda precisa ser melhor elucidada.



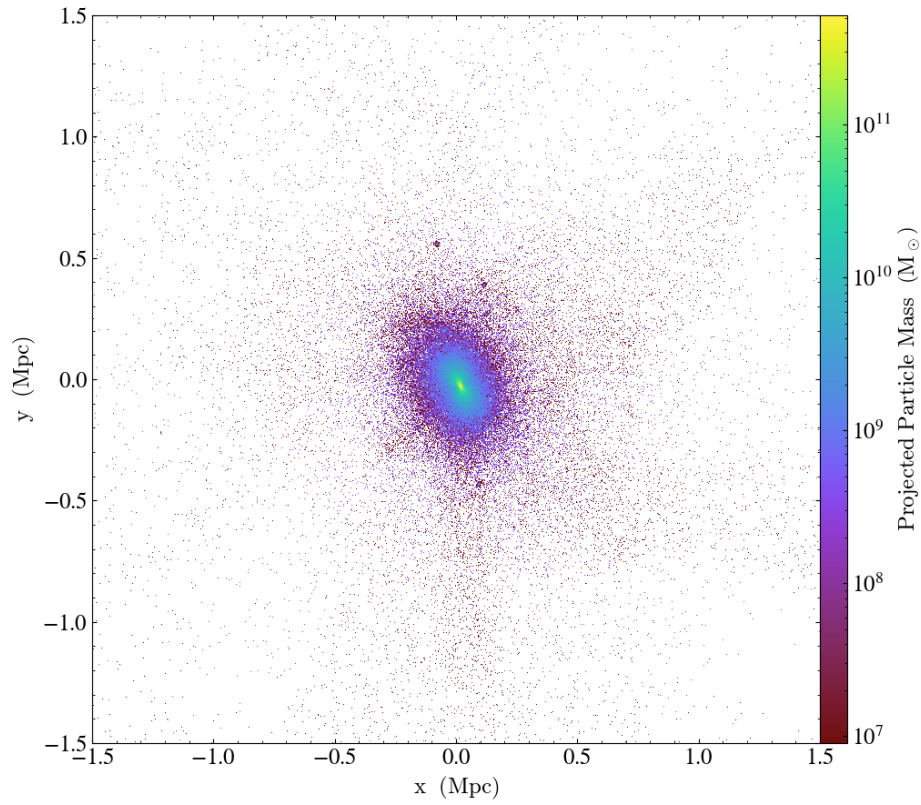
**Figura 7 – O Aglomerado Abell 1413.**  
**Fonte: Riseley *et al.* (2023).**

A Figura 8 mostra a distribuição de matéria no centro do Sistema e as galáxias membros. Os pequenos objetos esféricos escuros são galáxias membros. Uma porção significativa da matéria se concentra no centróide do aglomerado, o que sugere uma importante ação da gravitação sobre os membros do Sistema, com o efeito de romper os objetos membros e atraí-los para o centróide. A Figura 9 corresponde a uma ampliação no centro da Figura 8.

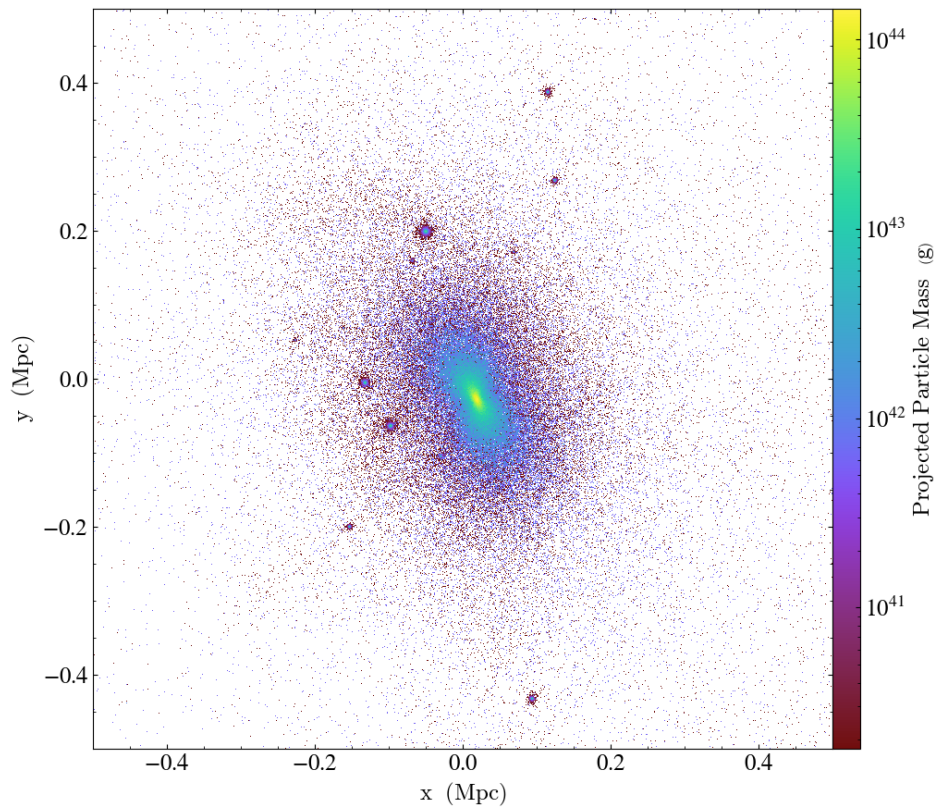
A cor do fundo foi mudada para branco, com a finalidade de estudarmos com maior detalhe o fenômeno gravitacional a partir da respectiva imagem. A matéria está acumulada no centróide do Sistema. Galáxias-membros orbitam em torno do halo, sofrendo efeitos de maré, perdendo matéria para o meio intra-aglomerado. Entretanto, elas podem ser visualizadas facilmente, o que é de se esperar em sistemas desta natureza.

Para esclarecer este fenômeno detalhadamente, são necessários estudos adicionais, como o resfriamento do gás “*cooling flow*”, e surtos de formação estelar. Para incorporar estes efeitos é necessária a realização de uma simulação de um modelo que leve em consideração o gás do meio intra-aglomerado. Assim, propõe-se a simulação de um aglomerado com o componente gasoso em trabalhos futuros.





**Figura 8 – Snapshot após 10 bilhões de anos de tempo simulado.  
Fonte: Autores.**



**Figura 9 – Ampliação da Figura 8.  
Fonte: Autores.**

## Conclusões

Estudando a dinâmica do aglomerado simulado no cenário simplificado, conclui-se que, embora o fenômeno do “*tidal stripping*” tenha ocorrido com objetos pertencentes ao aglomerado simulado, a violação da conservação da energia total do sistema em N-Corpos  $10^{-4}$ , melhor do que os resultados obtidos por Brandão (2006). Este resultado é considerado excelente, posto que os erros numéricos intrínsecos aos códigos de N-corpos se propagam de modo desprezível, no caso do Gadget-2 (Springel, 2005), por ser um código construído com base em cálculos numéricos que levam em consideração as forças gravitacionais e o fato de que as partículas simuladas são acolisionais dentro de uma mesma galáxia. Vale salientar que os fenômenos de maré intrínsecos aos aglomerados aconteçam, favorecendo a dispersão de partículas para o meio intergaláctico e intra-aglomerado. Entretanto, as galáxias conseguem manter-se estáveis, como se pode verificar através da densidade projetada, conforme se exibem nas Figuras 3, 4, 5 e 6.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à UESC.

## Referências

- Binney, J., (1998), *Galactic Astronomy*, Princeton University Press; Illustrated edition.
- Binney, J. & Tremaine, S. (2008), *Galactic Dynamics*, Princeton University Press.
- Brandao, C. S. S., (2006), *Evolução de Grupos Compactos Através de Simulações Numéricas*, Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Hernquist, L., (1990), An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges, *Astrophysical Journal* v.356, p.359. [doi:10.1086/168845](https://doi.org/10.1086/168845)
- Kravtsov A. V. & Stefano Borgani, S., (2012), Formation of Galaxy Clusters, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 50:353-409, <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125502>
- Longair, M. S., (2008), *Galaxy Formation*, Second Edition, Springer.
- Riseley, C. J., Biava, N., Lusetti., G., Bonafede, A., Bonassieux, E., Botteon, A., Loi., F., Brunetti, G., Cassano, R., Osinga, E., Rajpurohit., K., Röttgerin. H., J., A., Shimwell, T., Timmerman, R. & Van Weeren, R. J., (2023), A 'MeerKAT-meets-LOFAR' study of Abell 1413: A moderately disturbed non-cool-core cluster hosting a 500 kpc 'mini'-halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. [doi:10.1093/mnras/stad2218](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2218)
- Schechter, P. An analytic expression for the luminosity function for galaxies, (1976). *The Astrophysical Journal*, v. 203, n. 2, p. 297–306, January. [doi:10.1086/154079](https://doi.org/10.1086/154079)
- Springel, V. (2005), The cosmological simulation code gadget-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 364, n. 4, p. 1105–1134. [doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x)
- Turk, M. J., Smith B. D., Oishi J. S., Skory S., Skillman S. W., Abel T. & Norman M. L., (2011), yt: A Multi-code Analysis Toolkit for Astrophysical Simulation Data, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192, 9. [doi:10.1088/0067-0049/192/1/9](https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/9)